ную жесткость можно не учитывать только в том случае, когда ее влияние на прогиб трубопровода незначительно по сравнению с влиянием осевой силы. Практически уравнение цепной линии можно использовать при расчетах укладки глубоководных трубопроводов относительно небольших диаметров. Поскольку кривизна цепной линии ни в одной ее точке не равна нулю, условия равенства нулю изгибающего момента на концах трубопровода у баржи и дна моря не удовлетворяются моделью цепной линии. Кроме того, при использовании уравнений цепной линии угол наклона трубопровода может несколько отличаться от действительного его значения.

Приближенное решение для цепной линии с малой изгибной жесткостью, полученное Планкеттом [20] с использованием асимптотического разложения в ряд угла наклона трубопровода θ, дает лучшую аппроксимацию упругой линии глубоководных трубопроводов. Уравнения цепной линии с малой изгибной жесткостью удовлетворяют граничным условиям на конце трубопровода, находящегося на барже, и изгибающему моменту, равному нулю в точке касания трубопровода морского дна. Однако для определения основных расчетных параметров необходимо решать сложную систему трансцендентных уравнений. Математические ограничения, налагаемые на уравнения цепной линии с малой изгибной жесткостью, не позволяют использовать полученные решения для расчета укладки трубопроводов на меньшие глубины (20—40 м).

В обоих приведенных методах принимается допущение, что морское дно в точке касания с трубопроводом горизонтально. Кроме того, в обоих методах не учитываются динамические напряжения, возникающие из-за движения баржи и воздействия на трубопровод волн и течений.

Анализ показывает, что уравнение (12.22) целесообразно решать численными методами с применением ЭВМ. Обычно задаются граничными условиями для угла поворота и кривизны трубопровода при $s=0$, считая известными параметры EI, H и p. Величиной реакции R_0 варьируют до тех пор, пока не получат заданную глубину погружения трубопровода и угол ее наклона на трубоукладочной барже.

При укладке с применением стрингера учитывают прогиб трубопровода от трубоукладочной баржи до нижнего конца стрингера. Кривизну и положение стрингера, а также параметр H подбирают такими, чтобы напряжения в любой точке трубопровода не превосходили максимально допустимые.

В случае укладки с трубоукладочных барж, оборудованных стрингерами, трубопровод принимает S-образную форму, имеющую выпуклую часть на стрингере и вогнутый провисающий участок от точки схода трубопровода со стрингера до дна. Стрингер поддерживает трубопровод, создавая в нем распределенные по длине и направленные вверх усилия. Задача стрингера — ограничить напряжения на выпуклом участке трубопровода. Обычно кривизна стрингера соответствует допустимому радиусу упругого изгиба трубы. С увеличением глубины укладки удлиняется провисающий участок и возрастают напряжения от изгиба трубопровода. Эти напряжения снижаются приложением к трубопроводу растягивающих усилий. С увеличением растягивающих усилий кривизна трубопровода уменьшается и возрастают осевые напряжения. Поскольку напряжения от изгиба на порядок выше осевых, создание натяжения уменьшает суммарные напряжения в трубопроводе, которые начинают возрастать только при приложении растягивающих усилий очень большой величины (несколько сотен тонн).

Максимальные напряжения создаются на выпуклом участке трубопровода, поскольку они с достаточной точностью ограничиваются заданной кривизной стрингера. Затем напряжения уменьшаются и вновь возрастают на вогнутом участке. Максимальные напряжения на вогнутом участке составляют примерно 75—80 % от максимальных напряжений на выпуклом участке трубопровода. При укладке трубопроводов с барж, оборудованных наклонными рампами (трубоукладочные баржи третьего поколения), максимальные напряжения возникают на вогнутом провисающем участке.

§ 12.6. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЛИНЫ СТРИНГЕРА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ НАТЯЖЕНИЯ ТРУБОПРОВОДА

С увеличением длины стрингера или натяжения напряжения в провисающем участке трубопровода уменьшаются. Однако, как отмечалось в § 12.4, чрезмерное увеличение длины стрингера нежелательно. Создание и поддержание неизменными значительных по величине продольных усилий в трубопроводе представляет определенные трудности. Поэтому при укладке глубоководных трубопроводов необходимо установить оптимальное соотношение между длиной стрингера и натяжением трубопровода. При составлении проекта организации строительства обычно задается максимальная допустимая кривизна упругого изгиба трубопровода. Она является определяющей при назначении конструкции стрингера, влияет на его длину, форму и положение, а также на необходимое усилие натяжения, прикладываемое к трубопроводу. Ниже приводятся два способа решения рассматриваемой задачи.

1. Установление зависимости между длиной стрингера и натяжением трубопровода начинается с решения уравнения (12.22). Это уравнение решают одним из численных методов, например, Рунге — Кутта или Адамса — Мултона. Задаются значениями изгибающего момента и угла поворота при $s=0$, соответствующими условиям укладки трубопровода. Неизвестную величину R_0 определяют итерационным путем, принимают ее та-